

О. А. РЕМЕЗ, И. К. ОГИНСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ
В КАЛИБРАХ СИСТЕМЫ «ОВАЛ-КВАДРАТ»

Разработка технологии прокатки для различных групп сталей на непрерывных станах, выполняется в отсутствие достаточно глубоких сведений о взаимосвязи высотной и поперечной деформаций в условиях переднего, заднего натяжения и совместного их действия. Недостаточно исследованным также, является влияние систем вытяжных калибров на параметры прокатки в непрерывных станах. Исследования параметров прокатки в калибрах системы «овал-квадрат» (рассмотрены на примере схемы «квадрат-овал» при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре) проводилось с использованием программы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D, разработанной компанией TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Исследования проводились для стали 08X13, указанная сталь относится к числу тех, которые обладают склонностью к повышенному уширению. Названная особенность сталей изучена в недостаточной степени, и по этой причине возникают трудности при разработке режимов обжатий. Результаты, представленные в статье предназначены, в частности, для использования в экспериментальных исследованиях.

Моделирование по указанной схеме выполнялось для случаев прокатки с различными сочетаниями переднего и заднего натяжения. Исследования проводились для условий рассогласования скоростей переднего, заднего, одновременно переднего и заднего концов полосы. Диапазон относительного рассогласования скоростей (по отношению к прокатке без натяжения) составил 2,5...10 % с кратностью 2,5.

Диапазон изменения коэффициентов вытяжки составил $\lambda = 1,12 \dots 1,72$, он является достаточно характерным для данной системы калибров.

Целью настоящей работы является развитие подходов к исследованиям кинематических параметров непрерывной сортовой прокатки на основе методов компьютерного моделирования, выявление на этой основе сведений о закономерностях изменения технологических параметров при непрерывной прокатке в системе вытяжных калибров «овал-квадрат».

Ключевые слова: моделирование, система калибров, реология, натяжение, коэффициент вытяжки, прокатка.

О. А. РЕМЕЗ, І. К. ОГІНСЬКИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ПРОКАТКИ
В КАЛІБРАХ СИСТЕМИ «ОВАЛ-КВАДРАТ»

Розробка технології прокатки для різних груп сталей на безперервних станах, виконується за відсутності досить глибоких відомостей про взаємозв'язок висотної та поперечної деформації в умовах переднього, заднього натягу і спільного їх дії. Недостатньо дослідженим також, є вплив систем витяжних калібрів на параметри прокатки в безперервних станах. Дослідження параметрів прокатки в калібрах системи «овал-квадрат» (розглянуті на прикладі схеми «квадрат-овал» при прокатці квадратної заготовки в овному калібрі) проводилося з використанням програми комп'ютерного моделювання процесів обробки металів тиском FORGE 3D, розробленої компанією TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Дослідження проводилися для сталі 08X13, зазначена сталь відноситься до числа тих, які мають схильність до підвищеного розширення. Названа особливість сталей вивчена в недостатньому ступені, і з цієї причини виникають труднощі при розробці режимів обтиснень. Результати, представлені в статті призначені, зокрема, для використання в експериментальних дослідженнях.

Моделювання по зазначеній схемі виконувалося для випадків прокатки з різними поєднаннями переднього та заднього натягу. Дослідження проводилися для умов неузгодженості швидкостей переднього, заднього, одночасно переднього і заднього кінців штаби. Діапазон відносної неузгодженості швидкостей (по відношенню до прокатки без натягу) склав 2,5 ... 10 % з кратністю 2,5.

Діапазон зміни коефіцієнтів витяжки склав $\lambda = 1,12 \dots 1,72$, цей діапазон є досить характерним для даної системи калібрів.

Метою цієї роботи є розвиток підходів до досліджень кінематичних параметрів безперервної сортової прокатки на основі методів комп'ютерного моделювання, виявлення на цій основі відомостей про закономірності зміни технологічних параметрів при безперервній прокатки в системі витяжних калібрів «овал-квадрат».

Ключові слова: моделювання, система калібрів, реологія, натяг, коефіцієнт витяжки, прокатка.

O. A. REMEZ, I. K. OGINSKIY

SIMULATION OF THE PROCESS OF CONTINUOUS ROLLING
IN THE PASSES OF THE SYSTEM "OVAL – SQUARE"

The development of technologies of rolling for different groups of steels in continuous mills is carried out in the absence of sufficiently profound knowledge about intercommunication between deformation through the height and transverse deformation in conditions of the front and backward pull (tension) and their joint action. The influence of the system of breakdown passes on parameters of rolling in continuous mills remains also insufficiently investigated. Investigations of parameters of rolling in passes of the system "oval – square" are introduced in the present work.. They are considered on the example of the scheme "square – oval" while rolling the square billet in the oval pass. Investigations were carried out using the program for computerized simulation of processes of metal forming FORGE 3D developed by the company TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. They were carried out for the steel 08X13 of the number of steels disposed to heightened spreading. The mentioned characteristic property of steels is insufficiently studied, and because of this are difficulties while developing drafting schedules. Results presented in this paper are intended, in particular, to be used in experimental studies.

Simulation according to presented scheme was carried out for cases of rolling with differed combinations of the front and backward tension. Investigations were made for conditions of mismatch of the front, back and simultaneously of the front and back ends of the strip. The range of relative mismatch of speeds (with respect to rolling without tension) was 2.5 ... 10%, with number divisible by 2.5.

The range of the change for the values of reduction ratio was $\lambda = 1.12 \dots 1.72$, what is sufficiently characteristic for the given system of passes.

The aim of the present work is the development of approaches to studying the kinematik parameters of continuous section rolling on the base of the methods of computerized simulation and discovering on this base information about mechanism of changing the technological parameters at the continuous rolling in the system of breakdown passes "oval – square".

Keywords: simulation, system of passes, rheology, tension, reduction ratio, rolling.

Система калибров «овал – квадрат» применяется в сортопрокатном производстве в числе других вытяжных систем при прокатке углеродистых и специальных сталей. Технологические основы создания названных систем были заложены достаточно давно, основными подходами при их создании были экспериментальные. Теоретические методы появились и получили свое развитие несколько позже, они продолжали развиваться в работах более позднего и настоящего периода времени

[1-16 и др.]. Разработка технологии прокатки для различных групп сталей на непрерывных станах, выполняется в отсутствие достаточно глубоких сведений о взаимосвязи высотной и поперечной деформаций в условиях переднего, заднего натяжения и совместного их действия. Недостаточно исследованным также, является влияние систем вытяжных калибров на параметры прокатки в непрерывных станах.

Основные сведения о закономерностях изменения технологических параметров и их взаимосвязи при прокатке в калибрах были установлены в результате физического моделирования. Методы компьютерного моделирования, активно развивающиеся в последнее время, позволяют получить дополнительные сведения, однако они не являются достаточными для использования в практических целях. Не все программные средства являются достаточно адаптированными для практических задач. Некоторые программные пакеты по своему замыслу являются специализированными для решения задач сортовой прокатки [17, 18], но и они в прямой форме не обладают достаточными возможностями. Недостаток апробированных решений, вызывает необходимость развития и создания новых научных подходов и делает работы в этих направлениях актуальными.

Целью настоящей работы является развитие подходов к исследованиям кинематических параметров непрерывной сортовой прокатки на основе методов компьютерного моделирования, выявление на этой основе сведений о закономерностях изменения технологических параметров при непрерывной прокатке в системе вытяжных калибров «овал-квадрат».

Исследования параметров прокатки в калибрах системы «овал-квадрат» проводилось с использованием программы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D, разработанной компанией TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Основой программы является метод конечных элементов. По утверждению разработчиков она обеспечивает выполнение расчетов технологических параметров с минимальным объемом натурных экспериментов. Программа предназначена для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением в достаточно широкой постановке, в части кинематики и условий трения металла и инструмента.

Расчет формоизменения, полей напряжений, степени деформации и температур основан на минимизации функционала вариационного принципа Лагранжа, функционал которого сформулирован следующим образом:

$$I = \int_V \left(\int_0^H T dH \right) dV - \int_V F_i \cdot U_i dV - \int_S f_i \cdot U_i dS \quad (1)$$

где T – интенсивность касательных напряжений; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; F_i , f_i , U_i – проекции векторов объемных сил, поверхностных нагрузок и скоростей течения, соответственно; S – площадь поверхности контакта металла с валком; V – деформируемый объем.

В программе используются конечные элементы в виде тетраэдров с линейной аппроксимацией среднего напряжения и кусочно – линейной аппроксимацией скорости (по угловым узлам элемента и узлу в центре тяжести элемента).

Соппротивление деформации (напряжение текучести) деформируемого материала могут быть заданы на основе данных Хензеля – Шпиттеля [19].

В FORGE 3D доступно 6 моделей для описания трения между деформируемым объектом и инструментом, одной из них является вязкопластическая модель трения:

$$\tau = -\alpha_f \cdot K \cdot |\partial_s|^{q-1} \cdot \partial_s \quad (2)$$

где α_f – коэффициент трения, который зависит от нормальных напряжений на контакте; q – чувствительность к скорости скольжения; ∂_s – разница касательных составляющих скоростей заготовки и инструмента.

Среди других: модель трения Треска, комбинированная модель закона Кулона и модели Треска, модель трения «Nocontact» (модель позволяет не учитывать контакт между инструментом и деформируемым объектом или между двумя деформируемыми объектами), модель трения Бернхардта и модель трения Ноймайера.

Основу тепловой части модели составляет уравнение теплопроводности, приведенное в общем виде:

$$\frac{dt}{dt} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q_{def}, \quad (3)$$

где α – коэффициент температуропроводности; q_{def} – тепло, выделяемое при деформации.

Граничные условия при решении температурной задачи:

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = h_c \cdot (T - T_c) + \varepsilon_r \cdot \sigma_r \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где n – вектор, ортогональный к поверхности; T_0 – температура окружающей среды или инструмента; ε_r – степень черноты поверхности; σ_r – константа Больцмана; h_c – коэффициент теплопередачи.

Исследования проводились для стали 08X13 с химическим составом по ГОСТ 5632-72. Указанная сталь относится к числу тех, которые обладают склонностью к повышенному уширению. Названная особенность сталей изучена в недостаточной степени, и по этой причине возникают трудности при разработке режимов обжатий. Указанные стали содержатся в марочном сортаменте заводов, производящие специальные стали и представляют практический интерес.

Результаты моделирования (табл. 1-3) были предназначены, в частности, для использования в экспериментальных исследованиях. Индексы и символы «Б/н» относятся к прокатке без натяжения, «Н» – к прокатке с натяжением. b_1 и F_1 – соответственно, ширина раската и площадь поперечного сечения после прокатки. Параметр h_1 означает высоту раската после прокатки, численно он равен высоте раската по дну калибра, например, на рис. 2 $h_1=2$ мм. V_0 – скорость раската на входе в очаг деформации, V_1 – скорость прокатки.

Исходные данные и условия моделирования прокатки: скорость вращения валков – 32 об/мин, размеры заготовки – квадрат со стороной 20 мм ($h_0 = 28,56$ мм; $b_0 = 28,56$ мм), диаметр по дну калибра – 194 мм.

Свойства деформируемых материалов представлены реологическими зависимостями, приведенными в работе [20], в графическом виде они представлены на рис. 1.

Форма и размеры овального калибра, а также задаваемой в него квадратной заготовки представлены на рис. 2. Параметры названного калибра соответствовали тому, который был предназначен для использования в экспериментальных исследованиях, этим и обусловлен выбор его размеров и формы.

Таблиця 1. Результати моделювання процесу прокатки по схемі «квадрат-овал» с заднім натяженням

h1, мм	F1, мм ²			b1, мм			Δb, мм		λ			V ₀ /V _{0H1}	V _{H1} /V ₁	Δb _{H1} /Δb	λ _{H1} /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б/н	Н	Б/н	Н	Δ, %				
11	27,15	26,50	-2,437	274,07	269,27	-1,786	7,15	6,50	1,46	1,49	1,754	1,025	0,994	0,910	1,018
13	24,87	24,46	-1,675	303,54	298,48	-1,693	4,87	4,46	1,32	1,34	1,665	1,025	0,995	0,916	1,017
14	23,88	23,50	-1,611	317,19	313,16	-1,287	3,88	3,50	1,26	1,28	1,271	1,025	0,995	0,902	1,013
15	22,99	22,58	-1,822	330,06	324,57	-1,692	2,99	2,58	1,21	1,23	1,663	1,025	0,990	0,862	1,017
16	22,19	21,88	-1,443	343,16	338,60	-1,347	2,19	1,88	1,17	1,18	1,329	1,025	0,994	0,856	1,013
17	21,46	21,06	-1,875	356,76	351,02	-1,337	1,46	1,06	1,12	1,14	1,609	1,025	0,990	0,729	1,016
11	27,15	26,07	-4,112	274,07	264,83	-3,490	7,15	6,07	1,46	1,51	3,372	1,050	0,993	0,850	1,035
13	24,87	23,82	-4,395	303,54	294,14	-3,197	4,87	3,82	1,32	1,36	3,098	1,050	0,993	0,785	1,032
14	23,88	23,21	-2,890	317,19	308,73	-2,741	3,88	3,21	1,26	1,30	2,667	1,050	0,992	0,827	1,027
15	22,99	22,14	-3,830	330,06	321,50	-2,663	2,99	2,14	1,21	1,24	2,594	1,050	0,984	0,716	1,027
16	22,19	21,57	-2,907	343,16	335,31	-2,341	2,19	1,57	1,17	1,19	2,287	1,050	0,987	0,714	1,023
17	21,46	20,83	-3,006	356,76	347,92	-2,542	1,46	0,83	1,12	1,15	2,477	1,050	0,976	0,570	1,025
11	27,15	25,74	-5,463	274,07	261,89	-4,652	7,15	5,74	1,46	1,53	4,445	1,075	0,991	0,803	1,047
13	24,87	23,71	-4,903	303,54	290,63	-4,442	4,87	3,71	1,32	1,38	4,253	1,075	0,983	0,761	1,044
14	23,88	22,63	-5,552	317,19	303,68	-4,451	3,88	2,63	1,26	1,32	4,261	1,075	0,981	0,676	1,045
15	22,99	21,88	-5,047	330,06	317,87	-3,835	2,99	1,88	1,21	1,26	3,693	1,075	0,978	0,630	1,038
16	22,19	21,22	-4,584	343,16	331,20	-3,611	2,19	1,22	1,17	1,21	3,485	1,075	0,981	0,556	1,036
17	21,46	20,52	-4,561	356,76	344,12	-3,673	1,46	0,52	1,12	1,16	3,542	1,075	0,960	0,358	1,037
11	27,15	24,94	-8,827	274,07	256,92	-6,676	7,15	4,94	1,46	1,33	-9,516	1,100	0,982	0,692	0,913
13	24,87	23,01	-8,072	303,54	286,21	-6,053	4,87	3,01	1,32	1,35	2,182	1,100	0,975	0,619	1,022
14	23,88	22,35	-6,850	317,19	301,06	-5,360	3,88	2,35	1,26	1,35	6,379	1,100	0,976	0,606	1,068
15	22,99	21,62	-6,328	330,06	316,56	-4,264	2,99	1,62	1,21	1,36	11,154	1,100	0,967	0,542	1,126
16	22,19	21,04	-5,497	343,16	329,98	-3,995	2,19	1,04	1,17	1,37	15,224	1,100	0,965	0,473	1,180
17	21,46	20,31	-5,641	356,76	343,04	-4,000	1,46	0,31	1,12	1,43	21,480	1,100	0,934	0,214	1,274

Таблиця 2. Результати моделювання процесу прокатки по схемі «квадрат-овал» з переднім натяженням

h1, мм	F1, мм ²			b1, мм			Δb, мм		λ			V ₀ /V _{он1}	V _{III} /V _I	Δb _{III} /Δb	λ _{III} /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б/Н	Н	Б/Н	Н	Δ, %				
11	27,15	26,77	-1,413	274,07	269,97	-1,522	7,15	6,77	1,46	1,48	1,499	0,989	1,025	0,947	1,015
13	24,87	24,55	-1,311	303,54	299,20	-1,451	4,87	4,55	1,32	1,34	1,430	0,977	1,025	0,934	1,015
14	23,88	23,60	-1,196	317,19	311,96	-1,678	3,88	3,60	1,26	1,28	1,651	1,000	1,025	0,927	1,017
15	22,99	22,65	-1,491	330,06	324,72	-1,646	2,99	2,65	1,21	1,23	1,619	0,980	1,025	0,887	1,016
16	22,19	21,86	-1,508	343,16	338,31	-1,432	2,19	1,86	1,17	1,18	1,412	0,980	1,025	0,850	1,014
17	21,46	21,12	-1,593	356,76	351,64	-1,458	1,46	1,12	1,12	1,14	1,435	0,980	1,025	0,769	1,015
11	27,15	26,26	-3,379	274,07	266,68	-2,771	7,15	6,26	1,46	1,50	2,696	0,993	1,05	0,876	1,028
13	24,87	24,20	-2,759	303,54	295,26	-2,802	4,87	4,20	1,32	1,35	2,726	0,975	1,05	0,863	1,028
14	23,88	23,19	-2,973	317,19	308,28	-2,892	3,88	3,19	1,26	1,30	2,811	0,989	1,05	0,822	1,029
15	22,99	22,35	-2,858	330,06	321,33	-2,718	2,99	2,35	1,21	1,24	2,646	0,969	1,05	0,786	1,027
16	22,19	21,55	-2,962	343,16	335,15	-2,390	2,19	1,55	1,17	1,19	2,334	0,967	1,05	0,709	1,024
17	21,46	20,98	-2,293	356,76	347,71	-2,604	1,46	0,98	1,12	1,15	2,536	0,968	1,05	0,670	1,026
11	27,15	26,03	-4,289	274,07	264,63	-3,568	7,15	6,03	1,46	1,51	3,445	0,958	1,075	0,844	1,036
13	24,87	23,84	-4,332	303,54	292,09	-3,921	4,87	3,84	1,32	1,37	3,773	0,974	1,075	0,788	1,039
14	23,88	22,97	-3,983	317,19	305,36	-3,876	3,88	2,97	1,26	1,31	3,731	0,972	1,075	0,764	1,039
15	22,99	22,02	-4,409	330,06	318,01	-3,791	2,99	2,02	1,21	1,26	3,652	0,963	1,075	0,675	1,038
16	22,19	21,33	-4,031	343,16	331,51	-3,512	2,19	1,33	1,17	1,21	3,393	0,967	1,075	0,608	1,035
17	21,46	20,69	-3,688	356,76	345,13	-3,369	1,46	0,69	1,12	1,16	3,258	0,956	1,075	0,476	1,034
11	27,15	25,73	-5,502	274,07	260,85	-5,069	7,15	5,73	1,46	1,53	4,824	0,953	1,1	0,802	1,051
13	24,87	23,69	-4,971	303,54	288,65	-5,159	4,87	3,69	1,32	1,39	4,906	0,964	1,1	0,758	1,052
14	23,88	22,71	-5,147	317,19	301,65	-5,153	3,88	2,71	1,26	1,33	4,900	0,974	1,1	0,699	1,052
15	22,99	21,84	-5,261	330,06	314,05	-5,097	2,99	1,84	1,21	1,27	4,850	0,947	1,1	0,616	1,051
16	22,19	21,13	-5,037	343,16	328,37	-4,505	2,19	1,13	1,17	1,22	4,311	0,955	1,1	0,515	1,045
17	21,46	20,55	-4,392	356,76	343,24	-3,940	1,46	0,55	1,12	1,17	3,790	0,938	1,1	0,381	1,039

Таблиця 3. Результати моделювання процесу прокатки по схемі «квадрат-овал» з переднім і заднім натяженням

h1, мм	b1, мм			F1, мм ²			ΔB, мм		λ			$V_0/V_{0H} = V_{H1}/V_1$	Δb _{H1} /Δb	λ _{H1} /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б/Н	Н	Б/Н	Н	Δ, %			
11	27,15	25,78	-5,279	274,07	262,00	-4,608	7,15	5,78	1,46	1,53	4,405	0,950	1,025	1,046
13	24,87	23,62	-5,291	303,54	290,06	-4,646	4,87	3,62	1,32	1,38	4,439	0,950	1,025	1,046
14	23,88	22,86	-4,456	317,19	306,32	-3,550	3,88	2,86	1,26	1,31	3,428	0,957	1,025	1,035
15	22,99	21,67	-6,075	330,06	315,78	-4,521	2,99	1,67	1,21	1,27	4,326	0,943	1,025	1,045
16	22,19	21,16	-4,901	343,16	332,13	-3,319	2,19	1,16	1,17	1,20	3,212	0,953	1,025	1,033
17	21,46	20,29	-5,731	356,76	340,46	-4,788	1,46	0,29	1,12	1,17	4,567	0,946	1,025	1,048
11	27,15	24,21	-12,130	274,07	250,06	-9,602	7,15	4,21	1,46	1,60	8,761	0,892	1,05	1,096
13	24,87	22,33	-11,387	303,54	281,20	-7,943	4,87	2,33	1,32	1,42	7,359	0,898	1,05	1,079
14	23,88	21,57	-10,710	317,19	292,81	-8,327	3,88	1,57	1,26	1,37	7,687	0,903	1,05	1,083
15	22,99	20,81	-10,461	330,06	310,76	-6,212	2,99	0,81	1,21	1,29	5,848	0,905	1,05	1,062
16	22,19	20,25	-9,578	343,16	324,20	-5,849	2,19	0,25	1,17	1,23	5,526	0,913	1,05	1,058
17	21,46	19,60	-9,470	356,76	333,53	-6,966	1,46	-0,40	1,12	1,20	6,511	0,913	1,05	1,070
11	27,15	22,99	-18,064	274,07	239,22	-14,568	7,15	2,99	1,46	1,67	12,715	0,847	1,075	1,146
13	24,87	21,30	-16,767	303,54	268,45	-13,071	4,87	1,30	1,32	1,49	11,560	0,856	1,075	1,131
14	23,88	20,60	-15,940	317,19	286,22	-10,822	3,88	0,60	1,26	1,40	9,765	0,863	1,075	1,108
15	22,99	20,13	-14,218	330,06	301,57	-9,448	2,99	0,13	1,21	1,33	8,632	0,876	1,075	1,094
16	22,19	19,72	-12,518	343,16	314,82	-9,002	2,19	-0,28	1,17	1,27	8,259	0,889	1,075	1,090
17	21,46	19,16	-12,012	356,76	325,45	-9,620	1,46	-0,84	1,12	1,23	8,774	0,893	1,075	1,096
11	27,15	22,43	-21,025	274,07	232,66	-17,800	7,15	2,43	1,46	1,72	15,110	0,826	1,1	1,178
13	24,87	20,26	-22,747	303,54	256,73	-18,230	4,87	0,26	1,32	1,56	15,419	0,815	1,1	1,182
14	23,88	19,96	-19,644	317,19	273,93	-15,795	3,88	-0,04	1,26	1,46	13,640	0,836	1,1	1,158
15	22,99	19,48	-18,034	330,06	286,42	-15,238	2,99	-0,52	1,21	1,40	13,223	0,847	1,1	1,152
16	22,19	18,93	-17,251	343,16	299,94	-14,409	2,19	-1,07	1,17	1,33	12,594	0,853	1,1	1,144
17	21,46	18,67	-14,957	356,76	313,57	-13,773	1,46	-1,33	1,12	1,28	12,104	0,870	1,1	1,138

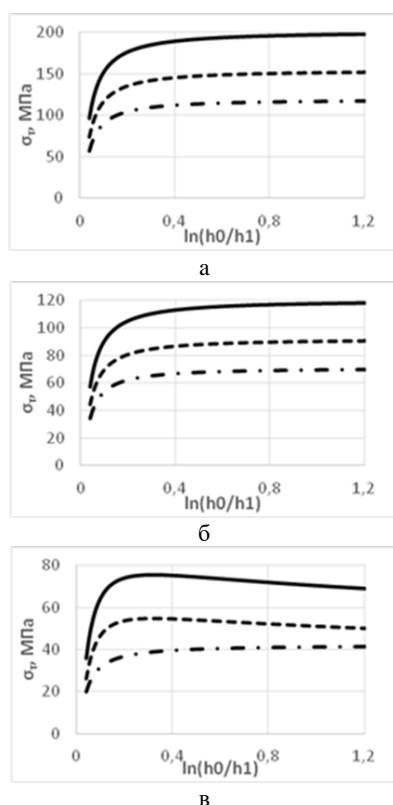


Рис. 1. Реологические зависимости стали 08X13: а) температура деформации 800 °С; б) температура деформации 1000 °С; в) температура деформации 1200 °С; u : — 10 c^{-1} ; u : ---- 1 c^{-1} ; u : - · - · 0,1 c^{-1} .

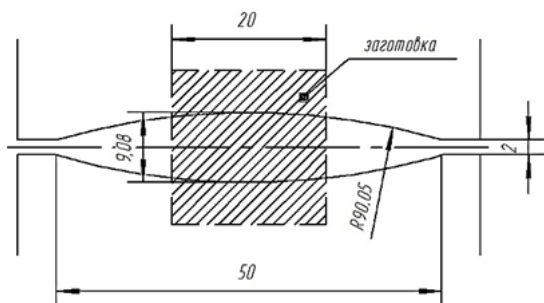


Рис. 2 – Овальный калибр и задаваемый в него профиль

Система «овал – квадрат» рассмотрена на примере схемы «квадрат-овал» при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре. Моделирование по указанной схеме выполнялось для случаев прокатки с различными сочетаниями переднего и заднего натяжения. Исследования проводились для условий рассогласования скоростей переднего, заднего, одновременно переднего и заднего концов полосы. Диапазон относительного рассогласования скоростей (по отношению к прокатке без натяжения) составил 2,5...10 % с кратностью 2,5.

Диапазон изменения коэффициентов вытяжки составил $\lambda=1,12...1,72$, он является достаточно характерным для данной системы калибров.

Выводы. Выполнено моделирование процесса прокатки квадратной заготовки в овальном калибре. Исследованы изменения деформационных и кинематических параметров непрерывной прокатки в

зависимости от варьируемых параметров. Выявлены закономерности изменения параметров прокатки во взаимосвязи друг с другом. Выявлен качественный и количественный (для исследованного диапазона параметров) характер изменения параметров прокатки в зависимости от натяжения (рассогласования скоростей). Предварительное сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных позволяют сделать вывод о достаточной их сходимости и возможности использования программы FORCE 3D для решения практических задач, связанных с прокаткой в системе калибров «овал-квадрат».

Список литературы

1. Dyja H. Using software product FORGE3 for researching of the special steel broadening/ H. Dyja, O. Remez, S. Mroz, A. Samsonenko // Hutnik. Collection of science papers № 5 – 2010 – p. 225–227.
2. Данченко В. Н. Теоретическое исследование изменения ширины профиля при прокатке специальных сталей в калибрах простой формы с использованием программного продукта FORGE3/ В. Н. Данченко., О. А. Ремез, Sebastian Mroz, А. А. Самсоненко // Сборник научных трудов Обработки материалов давлением №1(22) – 2010 – С. 210–217
3. Mroz S. Investigation of wear of roughing stand's rolls of the section mill at rolling of crane rails / S. Mroz, O. Remez, V. Andreiev, A. Samsonenko, M. Kraev, O. Kuzmina // HUTNIK. WIADOMOSCI HUTNICZE. – Tom LXXIX. – # 5. – 2012 – PP. 349–352.
4. Миленин А. А. Проблемы разработки и применения трехмерных численных моделей для оптимизации процессов прокатки / А. А. Миленин // Наукові вісті: Сучасні проблеми металургії. – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 36–46.
5. Modelowanie procesow kucia swobodnego: seria "Metalurgia" / [H. S. Dyja, G. A. Banaszek, V. A. Grynkevych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – No 42 – 355 p.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [та інш.] // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. Пластична деформація металів. – 2002. – Т. 5. – С. 250–254.
7. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
8. Онищенко И. И. Теория непрерывной прокатки / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1998 – 470 с.
9. Непрерывная прокатка / Коллективная монография под редакцией д. т. н., проф. В. Н. Данченко. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 588 с. – ISBN 966-7616-40-1.
10. Чекмарев А. П. Межклетовое натяжение при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, И. А. Чекмарев, А. Я. Семенюта // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1970. – № 55. – С. 5–7.
11. Предельные значения динамического и кинематического натяжения при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев, А. А. Динник [и др.] // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1970. – № 55. – С. 7–14.
12. Чекмарев А. П. Деформация полосы в межклетовом пространстве при непрерывной прокатке с натяжением / А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 24–40.
13. Комплексное исследование процесса непрерывной прокатки / [А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко, В. В. Гетманец, М. П. Топоровский] // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 41–73.
14. Мутьев М. С. Исследование процесса прокатки с натяжением / М. С. Мутьев, Л. Н. Левченко, Л. Ф. Машкин // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 73–87.

15. Динник А. А. Исследование межклетевой деформации полосы на непрерывном проволочном стане / А. А. Динник, Л. Б. Черногоров, А. Н. Комаров // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 104–110.
16. К вопросу определения межклетевых деформаций при горячей прокатке на непрерывных станах / [В. И. Тарновский, А. А. Поздеев, В. И. Еремеев, А. Г. Криволапов] // Сборник научных трудов: Челябинский политехнический институт. – Челябинск, 1968. – № 54. – С. 29–39.
17. Миленин А. А. Разработка научных основ и развитие технологий трехмерного пластического формоизменения металлов с применением методов компьютерного моделирования: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.03.05 / Миленин Андрей Анатольевич. – Днепропетровск, 2001. – 320 с.
18. Ершов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системе сортовых калибров: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.03.05 / Ершов Сергей Владимирович. – Днепропетровск, 2008. – 301 с.
19. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
20. Полухин П. И./ Сопrotivление пластической деформации металлов и сплавов // П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
9. Nepreryvnaya prokatka / Kollektivnaya monografiya pod redaktsiyey d. t. n., prof. V. N. Danchenko. – Dnipropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2002. – 588 p. – ISBN 966-7616-40-1.
10. Chekmarev A. P. Mezkhkletevoye natyazheniye pri nepreryvnoy prokatke / A. P. Chekmarev, I. A. Chekmarev, A. YA. Semenyuta // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – No 55. – P. 5–7.
11. Predel'nyye znacheniya dinamicheskogo i kinemacheskogo natyazheniya pri nepreryvnoy prokatke / A. P. Chekmarev, V. I. Prokof'yev, A. A. Dinnik [i dr.] // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – No 55. – P. 7–14.
12. Chekmarev A. P. Deformatsiya polosity v mezkhkletevom prostranstve pri nepreryvnoy prokatke s natyazheniyem / A. P. Chekmarev, I. I. Onishchenko // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 24–40.
13. Kompleksnoye issledovaniye protsessa nepreryvnoy prokatki / [A. P. Chekmarev, I. I. Onishchenko, V. V. Getmanets, M. P. Toporovskiy] // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 41–73.
14. Mut'yev M. S. Issledovaniye protsessa prokatki s natyazheniyem / M. S. Mut'yev, L. N. Levchenko, L. F. Mashkin // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 73–87.
15. Dinnik A. A. Issledovaniye mezkhkletevoy deformatsii polosity na nepreryvnom provolochnom stane / A. A. Dinnik, L. B. Chernogorov, A. N. Komarov // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 104–110.
16. K voprosu opredeleniya mezkhkletevykh deformatsiy pri goryachey prokatke na nepreryvnykh stanakh / [V. I. Tarnovskiy, A. A. Pozdreyev, V. I. Yermeyev, A. G. Krivolapov] // Sbornik nauchnykh trudov: Chelyabinskii politekhnicheskii institut. – Chelyabinsk, 1968. – No 54. – P. 29–39.
17. Milenin A. A. Razrabotka nauchnykh osnov i razvitiye tekhnologiy trekhmernogo plasticheskogo formoizmeneniya metallov s primeneniyyem metodov komp'yuternogo modelirovaniya: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.03.05 / Milenin Andrey Anatol'yevich. – Dnepropetrovsk, 2001. – 320 p.
18. Yershov S. V. Razvitiye teorii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla pri prokatke krupnykh kruglykh profiley s ponizhennym treshchinoobrazovaniyyem v sisteme sortovykh kalibrov: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.03.05 / Yershov Sergey Vladimirovich. – Dneprodzerzhinsk, 2008. – 301 p.
19. Khenzel' A. Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki metallov davleniyem / A. Khenzel', T. Shpittel'. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 360 p.
20. Polukhin P. I./ Soprotivleniye plasticheskoy deformatsii metallov i spлавov // P. I. Polukhin, G. YA. Gun, A. M. Galkin. – Moscow: Metallurgiya, 1976. – 488 p.

References (transliterated)

1. Dyja H. Using software product FORGE3 for researching of the special steel broadening/ H. Dyja, O. Remez, S. Mroz, A. Samsonenko // Hutnik. Collection of science papers No 5 – 2010 – p. 225–227.
2. Danchenko V. N. Teoreticheskoye issledovaniye izmeneniya shiriny profilya pri prokatke spetsial'nykh staley v kalibrakh prostoy formy s ispol'zovaniyyem programmnoy produkta FORGE3/ V. N. Danchenko., O. A. Remez, Sebastian Mroz, A. A. Samsonenko // Sbornik nauchnykh trudov Obrabotka materialov davleniyem No1(22) – 2010 – P. 210–217
3. Mroz S. Investigation of wear of roughing stand's rolls of the section mill at rolling of crane rails / S. Mroz, O. Remez, V. Andreiev, A. Samsonenko, M. Kraev, O. Kuzmina // HUTNIK. WIADOMOSCI HUTNICZE. – Vol. LXXIX. – No 5. – 2012 – PP. 349–352.
4. Milenin A. A. Problemy razrabotki i primeneniya trekhmernykh chislennykh modeley dlya optimizatsii protsessov prokatki / A. A. Milenin // Naukovі vіstі: Suchasni problemi metalurgii. – 2002. – Vol. 5. – No 3. – P. 36–46.
5. Modelowanie procesow kucia swobodnego: seria "Metalurgia" / [H. S. Dyja, G. A. Banaszek, V. A. Grynkevych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – No 42 – 355 p.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [ta insh.] // Naukovі vіstі. Suchasni problemy metalurhiyi. Plastychna deformatsiya metaliv. – 2002. – Vol. 5. – P. 250–254.
7. Vydrin V. N. Protess nepreryvnoy prokatki / V. N. Vydrin, A. S. Fedosiyenko, V. I. Kraynov. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – 456 p.
8. Onishchenko I. I. Teoriya nepreryvnoy prokatki / I. I. Onishchenko, P. I. Kutsenko, A. I. Kutsenko. – Zaporozh'ye: Izd-vo ZGIA, 1998 – 470 p.

Поступила (received) 10.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ремез Олег Анатольевич (Ремез Олег Анатолійович, Remez Oleg Anatolevich) – кандидат технічних наук, Національна металургічна академія України, доцент кафедри обробки металів давлением ім. А.П. Чекмарєва, тел.: (098) 757-31-82, e-mail: remez@metal-forming.org.

Огинский Иосиф Кузьмич (Огінський Йосип Кузьмич, Oginski Joseph Kuzmich) – доктор технічних наук, Запорізька державна інженерна академія, завідує кафедрою «Металургічного обладнання», тел. (067)8696733, e-mail: oginskyu@gmail.com